

Studies on the Stability of the Planetary Ionospheres-For the Cases of Venus and the Earth Ionospheres (惑星電離層の安定に関する研究-金星及び地球の電離層の場合)

著者	渡部 重十
号	859
発行年	1984
URL	http://hdl.handle.net/10097/24604

氏名・(本籍)	わた 渡 なべ 部 しげ 重 と 十
学 位 の 種 類	理 学 博 士
学 位 記 番 号	理博第 8 5 9 号
学位授与年月日	昭 和 59 年 3 月 27 日
学位授与の要件	学位規則第 5 条第 1 項該当
研 究 科 専 攻	東北大学大学院理学研究科 (博士課程) 地球物理学専攻
学位論文題目	Studies on the Stability of the Planetary Ionospheres— For the Cases of Venus and the Earth Ionospheres (惑星電離層の安定に関する研究—金星及び地球の電離層の 場合)
論文審査委員	(主査) 教 授 大 家 寛 教 授 上 山 弘 助 教 授 斉 藤 尚 生

論 文 目 次

PREFACE

ACKNOWLEDGEMENT

CONTENTS

PART I FORMATION OF VENUS IONOPAUSE

I . 1 Introduction

I . 2 Observations of Venus

I . 2 - 1 Bow Shock

I . 2 - 2 Ionosheath

I . 2 - 3 Ionopause

I . 2 - 4 Ionosphere

I . 3 Investigation of Venus Ionopause

I . 3 - 1 Electric Conductivities in Venus Ionosphere

- I . 3 – 2 Structure of Venus Ionopause
 - I . 4 Interaction of Solar Wind with Venus Ionosphere
 - I . 4 – 1 Model and Basic Equations
 - I . 4 – 2 Effective Particle Collision
 - I . 4 – 3 Numerical Solutions
 - I . 5 Comparison between Theory and Observation
 - I . 5 – 1 Thickness of Venus Ionopause
 - I . 5 – 2 Local Time Dependence of Thickness of Venus Ionopause
 - I . 5 – 3 Stability of Venus Ionopause
 - I . 6 Conclusion
- PART II PLASMA INSTABILITIES IN THE EARTH'S EQUATORIAL IONOSPHERE
- II . 1 Introduction
 - II . 2 Observations of the Plasma Irregularity in the Low Latitude Ionosphere of the Earth
 - II . 2 – 1 Observation by Bottom Side Sounder Technique
 - II . 2 – 2 Observation by Airglow Detection Technique
 - II . 2 – 3 Observation by Scintillation Detection Technique
 - II . 2 – 4 Observation by Radar Technique
 - II . 2 – 5 Observation by Rocket Technique
 - II . 2 – 6 Observation by Satellite Technique
 - II . 3 Observations of the Low Latitude Ionosphere of the Earth using the Satellite HINOTORI (ASTRO-A)
 - II . 3 – 1 Outline of the Instrumentation
 - II . 3 – 2 Typical Results
 - II . 4 Observations of the Plasma Irregularity in the Low Latitude Ionosphere of the Earth using the Satellite HINOTORI (ASTRO-A)
 - II . 4 – 1 Equatorial Plasma Bubbles
 - II . 4 – 2 Equatorial Plasma Blobs
 - II . 4 – 3 Statistical Analyses of the Plasma Irregularities
 - II . 4 – 3 – 1 Spatial Distribution
 - II . 4 – 3 – 2 Local Time Dependence
 - II . 4 – 3 – 3 Seasonal Dependence
 - II . 4 – 3 – 4 Effects of Magnetic Activity
 - II . 4 – 3 – 5 Effects of Solar Flux

II. 4 - 3 - 6 Effects of Ionospheric Electric Field and Neutral Wind

II. 5 Macroscopic Plasma Instabilities in the Ionosphere

II. 5 - 1 Model and Basic Equations

II. 5 - 2 Macroscopic Instabilities in the Ionospheric Plasma

II. 5 - 3 Dynamical Modelling of the Equatorial Ionosphere

II. 5 - 4 Relevant Parameters

(a) Neutral Gas Density

(b) Neutral, Ion and Electron Temperature

(c) Production Rate of the Ionized Constituent (Plasma)

(d) Loss Rate of the Ionized Constituent (Plasma)

(e) Ionospheric Electric Field

(f) Neutral Wind

(g) Boundary Condition

II. 5 - 5 Two Dimensional Distribution of the Instability Region

II. 6 Comparison of Theoretical Calculations with Observational Results

II. 6 - 1 Spatial Distribution

II. 6 - 2 Local Time Dependence

II. 6 - 3 Seasonal Dependence

II. 6 - 4 Effects of Magnetic Activity

II. 6 - 5 Effects of Solar Flux

II. 6 - 6 Effects of Ionospheric Electric Field and Neutral Wind

II. 7 Conclusion

BIBLIOGRAPHY

APPENDIX

論文内容要旨

序 論

惑星をとりまいている大気は、太陽からの紫外線及びX線によって電離する。こうして形成される惑星電離層中のプラズマ分布は惑星の重力場によって支配されると同時に、惑星の電磁環境によっても大きな変化をうける。惑星電離層におけるプラズマ分布については、最近惑星探査機による惑星電離層の直接的な観測によって、地球の電離層との比較が可能になり、その結果として地球の電離層とは大きく異なった構造が明らかとなるとともに、また地球電離層の本質も比較を通じてより明確にされた。

本論文は、地球の電離層と探査機によって詳細な観測がなされた金星の電離層について、それらの構造及びプラズマ分布の安定性に関する問題を解明することを目的としている。本論文の第1部では、固有の磁場をもたない金星電離層と太陽風との相互作用によって生成される電離圏境界面(イオノポーズ)について理論的に検討された。イオノポーズの構造は数値計算によって再現され、金星の周囲に打ち上げられた探査機パイオニア・ビーナスによって直接、イオノポーズを測定したデータと比較する。その結果は、太陽風のエネルギー及び運動量が波動と粒子の相互作用を通して金星の電離層中に注入されることを示している。本論文の第2部では、地球の電離層のプラズマ分布において、その安定性が述べられる。この研究は2つの点からなる。1つは宇宙科学研究所によって打ち上げられた科学衛星「ひのとり」に搭載されたインピーダンスプローブを用いた低緯度での地球の電離層の電子密度の観測及びそのデータの解析であり、他の1つは「ひのとり」によって観測された電子密度の不規則な構造に関する理論的考察である。電子密度分布の不規則構造は、2つのタイプに大きくわけられる。それらは、電子密度分布の減少として観測されるプラズマ・バブルと電子密度の増加として観測されるプラズマ・ブロップである。プラズマ・ブロップは「ひのとり」によって新たに発見されたものである。この発見及びプラズマ・バブルの詳細な解析は従来から考えられていた不規則構造の生成メカニズムでは、説明できないことが明らかとなってきた。そこで本論文では、新しい理論及びその計算結果と「ひのとり」によって得られたデータとの比較について述べられている。

第1部 金星のイオノポーズの構造

第1, 2章 金星の電離層と太陽風との相互作用に関する観測及び問題点

金星の周回軌道に投入された探査機ベネラ9, 10及びパイオニア・ビーナスによって、プラズマ分布及び電磁的環境が詳細に観測されている。特に、パイオニア・ビーナスは電離層中に直接入ることのできる軌道をとっているために地球外の惑星として初めて電離層の詳細な観測が可能となった。その結果は、地球とは大きく異なる構造を明らかにしている。地球と異なる構造は、地球のように太陽風の進入を拒否する強い磁場をもっていないために電離層と太陽風が直接相互作用していることによる。特に、電離層と太陽風の相互作用によって生成される

イオノポーズは図1に示すようにすべての物理量が急激に変化している領域として観測される。しかし、イオノポーズの観測は詳細になされたが、その理論的生成過程及び安定性については十分に考察されていない。本研究はイオノポーズの物理的生成過程及びその安定性について理論的に検討したものである。

第3章 金星のイオノポーズに関する理論的考察

本章では、金星のイオノポーズの位置を経度あるいは、緯度方向について、またその領域での電離層プラズマによる電流の寄与が調べられる。金星イオノポーズの位置は太陽風圧と金星電離層のプラズマの熱的圧力が、バランスした位置に生成される。しかし従来この考えで求められたイオノポーズの位置は、パイオニア・ビーナスによって観測されたものと一致しない。この原因は金星の電離層が太陽風によって強く加熱される効果を見逃したところにある。直接、測定されたプラズマの温度及び密度を用いて計算しなおすとパイオニア・ビーナスによって得られたイオノポーズの位置のデータとよく一致することが確認された。

第4章 太陽風と金星電離層の相互作用

金星のイオノポーズの数値計算は、イオン及び電子のエネルギー及び運動量の保存を用いたミクロな立場から出発し、粒子の分布関数を仮定することにより、プラズマの密度、磁場及び電場などが計算される。このモデルによる計算では、電離層に起源をもつ電子のラーマ半径(約40m)の数倍程度の厚さをもつイオノポーズが生成される。電離層の電子による電流によって維持されているイオノポーズでは、プラズマの熱速度を越える電子のドリフト速度が生じるために、このイオノポーズは一般に不安定になる。その結果これらの電子は波動と粒子の相互作用を通して強く散乱され、電子による電流の寄与が小さくなる。このように仮定して計算を実行した時、イオノポーズは電離層起源の酸素原子イオンによる電流によってそのバランスが維持される(図2)。これらのイオンも波動と粒子の相互作用を通して等価的な衝突が考えられる。衝突の効果は、等価的な拡散距離を導入することによってモデルの中にとり入れられた。この計算結果は第5章でパイオニア・ビーナスによって得られたデータと比較される。

第5章 理論と観測の比較

本章では第4章で与えられたモデルを用いて計算されたイオノポーズとパイオニア・ビーナスで観測されたイオノポーズが比較されている。等価的な拡散距離を仮定して計算されたイオノポーズは観測されたデータとみごとに一致する(図1)。この一致から異常拡散係数は $23.2\text{ km}^2/\text{sec}$ と求められた。数値計算からイオノポーズは緯度(又は経度)によってその構造が異なることも示され、イオノポーズの厚さは南北(又は東西)非対称性をもっていることも示唆される。さらにイオノポーズは太陽風の流れの速度に敏感であり、前章で記述したミクロな不安定同様、マクロな不安定も起こり得ることが示唆された。

第2部 地球の低緯度における電離層の不安定

第1, 2章 地域的低緯度における電離層の不安定に関する観測と問題点

強い磁場に覆われた地球の電離層は太陽風と直接相互作用することはない。しかし電離層内の磁場の形状によっては外的な力(重力, 電場, 中性大気風)が加わることによって電離層は不安定になる。

本論文では磁場が地表に平行である低緯度において, 電離層の安定性が議論される。低緯度での不安定はスプレッド F として1930年代後半から観測がなされている。しかし, このスプレッド F がロケット及び衛星で直接観測されるようになったのは, 1960年代に入ってからのことである。またこの構造は, 電子密度の減少として常に観測されることからプラズマ・バブルと呼ばれている。プラズマ・バブルの詳細な構造及び全地球的な頻度分布については完全に理解されていない。本論による「ひのとり」の観測によって, はじめて全地球的に詳細な頻度分布及び発生機構が知られるようになった。さらに「ひのとり」によって初めて, プラズマ・バブルとは逆の現象つまり電子密度の上昇として観測されるものが見い出された。この構造は我々によってプラズマ・ブロップと呼ばれている。この発見により従来の生成機構では, 電子密度の不規則な構造を説明できないことが示唆された。第2部では電子密度の不規則構造の観測, 解析及び理論的考察が行なわれる。

第3章 科学衛星「ひのとり」による低緯度での電離層の観測

科学衛星「ひのとり」は1981年2月宇宙科学研究所によって打ち上げられた。「ひのとり」は高度約600kmの準円軌道をもち傾斜角は約31°である。「ひのとり」に搭載されたインピーダンスプローブによってプラズマの電子密度が1秒おきに測定されている。この技術は大家(1966)によって開発されたものであり±3%以内で電子密度測定が可能である。

「ひのとり」を用いた電子密度の観測によって低緯度でのF層上部の電子密度分布が詳細に観測されている。「ひのとり」によって観測される主な現象はプラズマ・バブル, プラズマ・ブロップ, アップルトル・アノマリー, 波動状構造, 飛翔体の航跡などである。

第4章 「ひのとり」による電子密度の不規則構造の観測

図3で, プラズマ・バブルとプラズマ・ブロップの例を示す。電子密度の不規則構造は夜間見られるものであり, 低緯度で, しかも経度的にも限られた場所で出現する(図4)。その結果はプラズマ・バブルについて次のようにまとめられる。

- i) 夜間出現し, 特に出現しやすい時間帯が4つある。すなわちそれらは evening, pre-midnight, post-midnight および morning に分けられる。
- ii) 磁気赤道上で発生頻度が最大であり, 経度については, $\pm 100^\circ$ 内で頻度が高い。この経度依存性は季節によって変化する。
- iii) 磁気活動に対しては morning で発生したプラズマ・バブルと相関がある。
- iv) プラズマ・バブルは太陽活動が活発になると現われやすく特に post-midnight で現われたプラズマ・バブルは太陽活動の増加とともに発生頻度は急激に増加する。

- v) evening, pre-midnight のプラズマ・バブルはアップルトン・アノマリーの発達と関係があり、これは電離層の電場が関係していることを示唆している。

プラズマ・ブロップについては

- i) 夜間出現し、特に post-midnight で頻度が高い。
- ii) 磁気緯度 $\geq \pm 15^\circ$ で出現する。
- iii) 磁気活動度が低い時に出現しやすい。
- iv) 太陽活動が低い時に出現しやすい。

といったものである。

第5章 電離層におけるプラズマのマクロ不安定

「ひのとり」によって得られたプラズマ・バブルの詳細な解析及びプラズマ・ブロップの発見は、従来から提唱されていた単純なレーリー・テラー不安定による生成機構では説明できないことが明らかとなってきた。そこで電離層内の電場及び中性大気風によって引き起こされる $\vec{E} \times \vec{B}$ ドリフト不安定及び中性大気風起動による不安定を含んだ、より一般化されたレーリー・テラー不安定を考えることによって「ひのとり」により得られたデータを説明しようと試みた。従来のレーリー・テラー不安定では、電離層の F 層下部での不安定を示していたが、一般化されたレーリー・テラー不安定では電離層の F 層下部だけでなく F 層上部でも不安定が生じることが示された。この F 層上部の不安定こそ「ひのとり」によって発見されたプラズマ・ブロップの生成に対応している。

一般化されたレーリー・テラー不安定は、重力、電場、中性大気風及び磁場の形状だけでなく、電離層プラズマの空間的な密度分布に強く依存している。そこでプラズマ分布を実際にシミュレートすることによって空間的及び時間的な不安定性の成長率を知ることができる。電離層のプラズマ分布は電場、中性大気風及び中性大気密度分布に強く依存するのでこれらのモデルを使用することによって電離層の電子密度分布をシミュレートした。その結果電離層が不安定になる時間帯は、夜間に限られ、しかも電離層の F 層下部だけでなく F 層上部でも不安定になることが示された。

第6章 計算結果と「ひのとり」によって得られたデータとの比較

本章では「ひのとり」によって得られたデータと理論的に求められた計算結果とを比較している。その結果、第4章で得られたプラズマ・バブルの発生頻度は次のように説明されることが明らかとなった。

- i) evening での発生は、電離層内での強い東向き電場に対応するものであり、主に $\vec{E} \times \vec{B}$ ドリフト不安定によって引き起こされたものである。
- ii) pre-midnight での発生は、電離層内の東向き電場により、電離層が高々度に移動し、プラズマと中性大気との衝突が小さくなることによりレーリー・テラー不安定が強く引き起こされたものである。
- iii) post-midnight での発生は、中性大気が中緯度から低緯度に向かって強く吹く時であり

中性大気風で起動される不安定によって主に引き起こされたものである(図5)。

またプラズマ・ブロップについては、夜間(主に post-midnight)、中性大気風が磁気赤道を横切って流れた時、磁気赤道から離れた風下側に発生する。これは主に、中性大気風起動型不安定によって引き起こされる。

結論(第1部第6章、第2部第7章)

惑星電離層は重力場だけでなく惑星の電磁的環境によって、その構造が大きく異なる。本論文では、固有の磁場をもっていない金星と強い磁場をもっている地球とについて電離層の構造を研究した。

固有の磁場をもたない金星は、太陽風と直接、相互作用するために、相互作用域としてのイオノポーズが生成される。このイオノポーズについて理論的に考察し、数値計算が行なわれた。この計算によってイオノポーズでは、等価的な衝突が重要であり、等価的な衝突によって太陽風のエネルギー及び運動量が金星の電離層内に進入することが明らかとなった。またイオノポーズでは、このようなマイクロな不安定だけでなく、太陽風がイオノポーズのまわりを流れることによってマクロな不安定も起こりえる。この不安定はプラズマ密度分布の不規則な構造を導くものである。

強い磁場をもつ地球では低緯度において外的な力(重力、電場、中性大気風)によって電離層のプラズマ密度分布が不規則になる。この不規則構造は、科学衛星「ひのとり」に搭載されたインピーダンスプローブで電離層の電子密度分布を計測することによって多数例観測された。不規則構造は電子密度の減少として観測されるプラズマ・バブルと電子密度の上昇として観測されるプラズマ・ブロップの大きくわけて2つのタイプからなっている。後者は「ひのとり」の観測によって新たに発見されたものである。この発見されたプラズマ・バブルを解析した結果、従来から考えられていた単純なレーリー・テラー不安定では説明することができないことが明らかとなった。そこで新たに電離層内の電場及び中性大気風を取り入れた、より一般化されたレーリー・テラー不安定を考えることによって「ひのとり」で観測されたデータの説明を試みた。その結果はみごとに観測結果を説明している。

以上のように本研究は最近明らかになりつつある乱れ動く電離層の問題を理論及び科学衛星を用いた観測の両面から解明したもので外的な力(重力、電場、中性大気風)によって電離層が不安定になる様相を明確にしたものであり、これらの不安定は地球の電離層だけでなく、他の惑星電離層にも存在するものであることを示唆している。

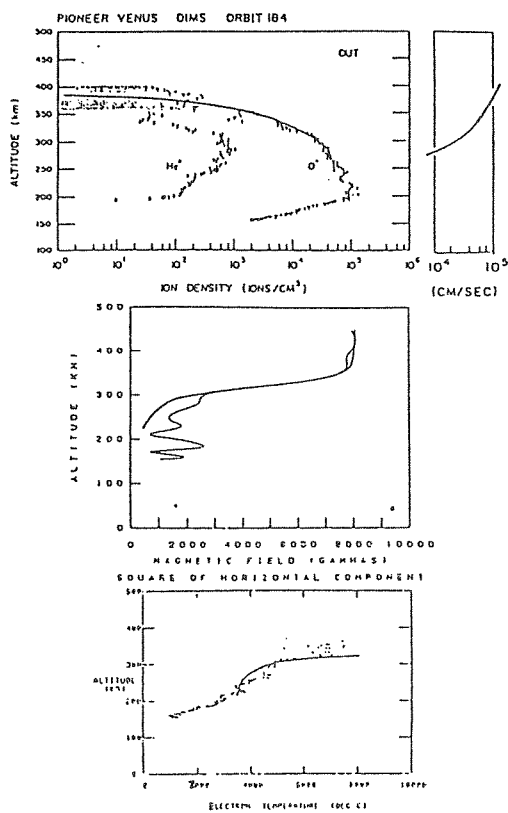


図1. パイオニア・ビーナスで観測された金星電離層とイオノポーズ。実線は数値計算による結果を示す。図は上図からそれぞれイオン密度と O^+ のドリフト速度。磁場強度及び電子温度を示している。

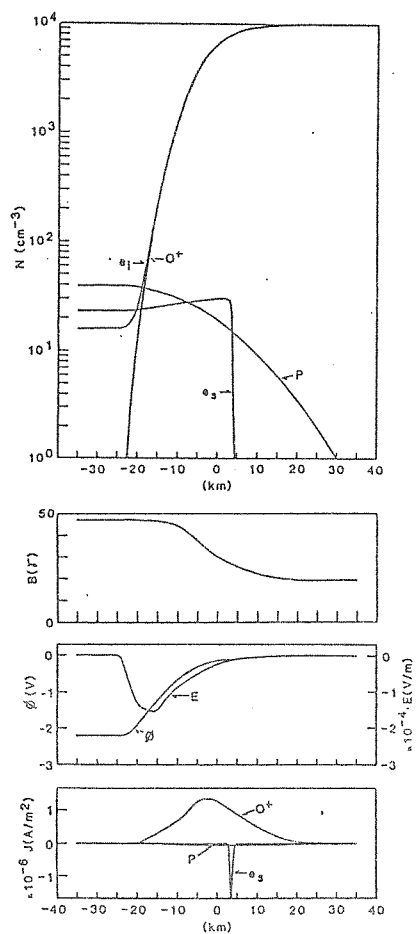


図2. 数値計算によって求められた金星イオノポーズの構造。

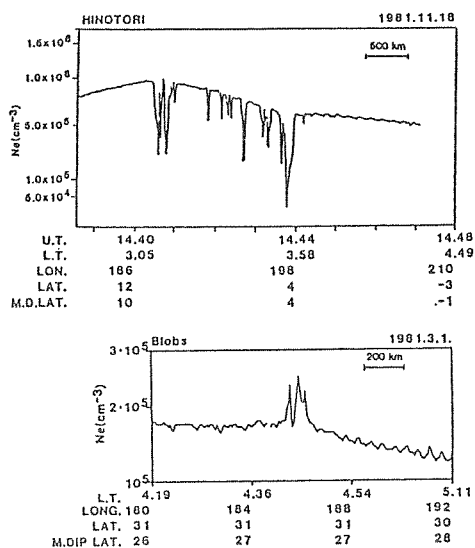


図3. 科学衛星「ひのとり」によって観測されたプラズマ・バブル(上図)とプラズマ・ブロッブ(下図)。

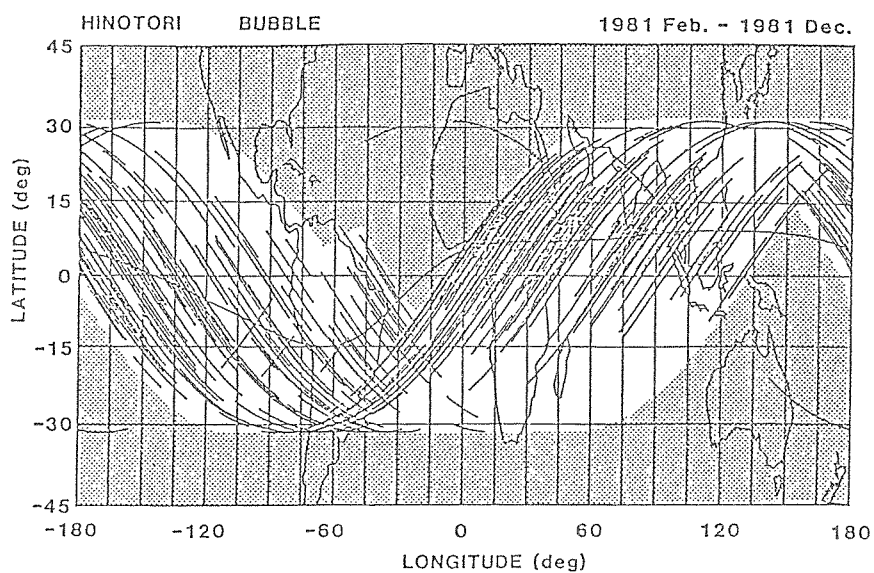


図4. 「ひのとり」によって観測されたプラズマ・バブルの位置。ハッチした部分は「ひのとり」では観測できない領域。プラズマ・バブルは磁気赤道域に集中していることがわかる。

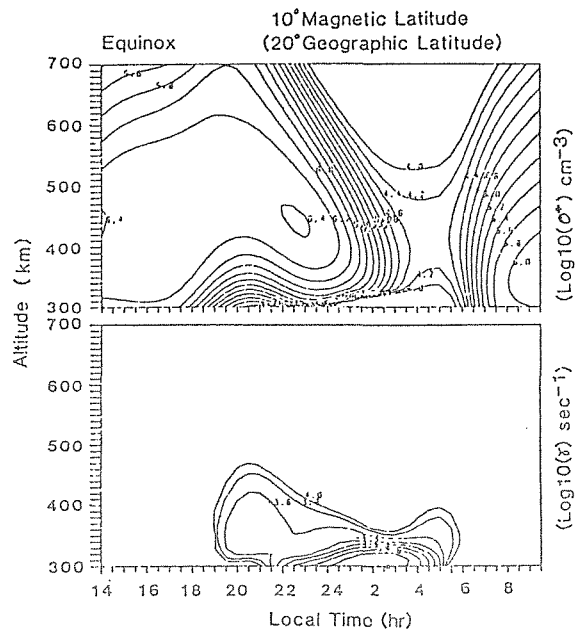


図5. シミュレートされた電離層(上図)とその時の電子密度不規則構造の成長率(下図)。

論文審査の結果の要旨

渡部重十提出の論文は、金星及び地球という二つの惑星の電離層の安定性について理論及び観測データの解析によって研究したものである。

金星は地球と類似した惑星であるが、磁場をもっていない。したがって、太陽風が直接電離層を襲ってきて、イオノポーズを形成する。本論はこのイオノポーズに関して、局所電磁場中を運動する粒子モデルにおいて、理論解析を行い、電離層プラズマが急激におちて太陽風プラズマに接する様子を数値的に示すことができた。特に波動と粒子の相互作用の効果が、この粒子運動に与える効果を取り入れるとイオノポーズの中は、過去に行なわれた金星イオノポーズの観測結果と良い一致を示す。

本論文の第2部では、地球の赤道域の電離層中に発生するプラズマ泡や、特に本研究の結果新しく発見されたプラズマ塊(プラズマ・ブロップ)等の巨大プラズマ擾乱の様相を我国が打ち上げた科学観測衛星、ひのとりを搭載されたインピーダンスプローブの観測に参加し、そのデータ解析を行うことによって実施した。データ解析の結果は、600kmレベルにおけるプラズマ泡の発生域についてはじめてその全体像を明らかにした。プラズマ泡の発生が地磁気緯度 $\pm 20^\circ$ 以内に限られる他、その分布に季節変動があること、また、発生の地方時依存性は、夕方19時と22時付近、午前2時前後、そしてあけ方6時付近といった明らかに4つのピークをもっている事も明らかになった。これに対してプラズマ・ブロップはその発生域がプラズマ泡の発生域外にある等、相補性をもって発生していてプラズマ泡発生の領域が電離層の下部域にあるのに対して、プラズマ・ブロップは電離層の上部(トップサイド)にあることも示した。

こうしたプラズマ泡とプラズマ・ブロップの発生原因を説明するために、本研究では、はじめて、通常のレーリーテラー不安定に加えて、電離層中の中性風、さらに局所電場及びプラズマ中の衝突効果を同時にとり入れた一般化されたレーリーテラー不安定を提唱する事になった。

以上、渡部重十提出の論文は独創性高く、緻密に組み立てられたもので、著者が自立して研究活動を行うに必要な高度の研究能力と学識を有する事を示している。よって渡部重十提出の論文は理学博士の学位論文として合格と認める。